

0- 778637

*На правах рукописи*



Шашкин Владимир Иванович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ  
ЭФФЕКТЫ В СЕЛЕКТИВНО ЛЕГИРОВАННЫХ  
ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ  
МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород - 2009

Работа выполнена в учреждении Российской академии наук  
Институте физики микроструктур РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
чл.-корр. РАН, профессор  
Д.Р. Хохлов

доктор физико-математических наук,  
С.В. Иванов

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Д.А. Павлов

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт радиотехники и электроники  
РАН (*Фрязинский филиал*)

Защита состоится 23 сентября 2009 года в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском  
государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950,  
г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского  
государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан 17 августа 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000549187

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

А.И. Машин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В последние десятилетия происходило стремительное развитие физики и технологии полупроводниковых гетероструктур, что привело к заметному обогащению полупроводниковой электроники идеями и возможностью создавать искусственные микро- и наноструктуры с необходимыми свойствами. Не вызывает сомнений продуктивность идеи использования искусственного наномасштабного потенциала, воздействующего на свободные носители заряда (или другие квазичастицы) в полупроводниках и ограничивающего их движение в одном или нескольких направлениях. Возникли новые термины для наноструктур различной размерности: квантовые ямы, нити и точки. Результаты фундаментальных и прикладных исследований в этой области оказались столь значительны, что привели к формированию новых научных направлений, таких как физика полупроводниковых микроструктур, нанофизика и наноэлектроника.

Когда речь идёт о микроструктурах с характерными масштабами потенциала  $\leq 10$  нм, неизбежно возникает ряд важных, взаимосвязанных задач, которые требуют решения. Это – развитие эпитаксиальной технологии роста гетероструктур со слоями нанометровой толщины, разработка способов контроля их параметров, построение теоретических моделей и постановка экспериментов для обнаружения новых физических явлений.

В данной работе проведено подобное исследование для двух типов структур: массивов металлических нанокластеров, встроенных в полупроводниковую матрицу, и планарных туннельных контактов металл – полупроводниковая микроструктура. Весьма активно изучается прототип первого объекта - GaAs с нанокластерами As или полуметаллическими наночастицами ErAs, который используют как сверхбыстрый фотопроводник в оптических системах генерации терагерцового излучения [1,2]. Большой интерес вызывают объекты второго типа, например, на основе сложной гетероструктуры InAs/GaSb/AlGaSb/AlSb/InAs с межзонным туннелированием [3,4]. Актуальность исследований обусловлена тем, что в транспортных процессах в этих структурах важную роль играет туннелирование, определяющее сильную нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ). Не менее важно то, что можно одновременно управлять токовыми и емкостными характеристиками структур. Можно увели-

чить на много порядков плотность тока, сохраняя сильную нелинейность ВАХ и малую удельную ёмкость контактов. Совокупность этих характеристик, вместе с малой инерционностью установления туннельного тока востребована в задачах детектирования, преобразования и умножения частот сигналов в суб- и терагерцовом диапазонах частот [5].

### **Объектом исследования**

в данной работе являются селективно легированные гетероэпитаксиальные микро- и наноструктуры металл-полупроводник (МП) на основе соединений Al-In-Ga-As-N.

### **Предметом исследования**

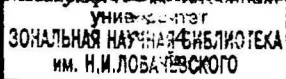
являются нелинейные транспортные явления при эмиссии, туннелировании и инжекции электронов в гетероэпитаксиальных микро- и наноструктурах металл-полупроводник.

### **Цель диссертационной работы состояла:**

- в развитии технологии металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), обеспечивающей получение атомарно резких профилей состава и легирования в гетероструктурах  $A_3B_5$  на основе соединений Al-In-Ga-N-As и осаждение на ростовую поверхность металла;
- в разработке методик формирования в условиях МОГФЭ многослойных массивов металлических нанокластеров, встроенных в монокристаллическую полупроводниковую матрицу;
- в экспериментальных исследованиях и построении физических моделей для полупроводниковых наноструктур с металлическими нанокластерами;
- в экспериментальных и теоретических исследованиях туннельных, эмиссионных и инжекционных транспортных явлений в селективно легированных микроструктурах МП;
- в разработке и изготовлении на основе селективно легированных микроструктур МП низкобарьерных диодов, обеспечивающих высокую чувствительность при приёме излучения миллиметрового диапазона длин волн.

### **Научная новизна**

1. На основе вольт-фарадных (CV) измерений в процессе электрохимического травления разработан метод восстановления профиля легирования полупроводников, не посредственно от поверх-





ности и с высоким пространственным разрешением на масштабах, меньших радиуса дебаевского экранирования.

2. Показано, что при пиролизе металлоорганических соединений Al и лазерном распылении Mo и W в реакторе МОГФЭ на атомарно чистой поверхности GaAs на начальных стадиях происходит формирование металлических нанокластеров с размерами  $\sim 10$  нм, после чего возможно возобновление эпитаксиального роста GaAs. При многократном повторении процессов получены многослойные нанокластерные структуры.
3. Получено аналитическое решение задачи о поперечном инжекционном токе в нелегированном полупроводниковом слое с любой комбинацией контактов: с металлом, с легированным полупроводником или с гетерослоем, ограничивающим инжекцию.
4. С использованием техники  $\delta$ -легирования и осаждения Al в реакторе МОГФЭ показана возможность снижения эффективной высоты барьера контакта Al/n-GaAs в пределах от 0,7 до 0 эВ.
5. На основе микроструктур МП с пониженной эффективной высотой барьера изготовлены планарные диоды, которые обеспечивают высокочувствительное детектирование и эффективное преобразование сигналов миллиметрового диапазона длин волн.

### **Практическая значимость**

1. На основе комплексного подхода, объединяющего эпитаксиальную (вертикальную) и микроэлектронную (планарную) технологии формирования микроструктур, разработаны и изготовлены мембранные планарные диоды Шоттки с субмикронными размерами анода, обеспечивающие эффективное преобразование частот в субтерагерцовом диапазоне (0,1÷1 ТГц).
2. Разработаны и изготовлены уникальные низкобарьерные диоды для детектирования без постоянного тока смещения и эффективного смещения сигналов при пониженной мощности гетеродина. Измеренные характеристики превосходят или соответствуют лучшим из известных аналогов. В частности, для планарного детектора на 94 ГГц величина вольт-ваттной чувствительности  $\gamma > 10000$  В/Вт при пороговой мощности  $NEP \sim 10^{-12}$  Вт Гц $^{-1/2}$ .
3. Планарные детекторы диапазона длин волн  $\lambda \approx 3$  мм допускают плотную компоновку в плоскости при слабом взаимовлиянии. Приёмная линейка из восьми планарных детекторов, располо-

женных в ряд с периодом  $3\lambda/2$ , позволила регистрировать поляризационно-чувствительные изображения объектов при просвечивании. Это доказывает работоспособность матричного приемника плотной компоновки и перспективность его применения в системах радиовидения.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Для гетероструктур на основе соединений Al-In-Ga-As-N метод МОГФЭ обеспечивает изменение состава и легирование с атомарной резкостью, получение атомарно гладких интерфейсов и осаждение металла без формирования промежуточных слоёв, что позволяет управлять туннельной прозрачностью контактов МП.
2. Полученный методом МОГФЭ искусственный материал, монокристаллический полупроводниковый GaAs с внедренными нанокластерными слоями Al, обладает пикосекундной временной динамикой отклика на межзонное оптическое возбуждение.
3. Модельное описание электрических свойств наноконтактов с барьером Шоттки свидетельствует о возрастании туннельной компоненты тока при уменьшении их размеров и малой инерционности нелинейных емкостных эффектов, сопровождающих их перезарядку, вплоть до терагерцовых частот.
4. Дельта-легирование кремнием слоя GaAs вблизи границы с алюминием позволяет управлять эффективной высотой барьера контакта МП в диапазоне  $0,7 \pm 0,2$  эВ при сохранении небольших значений фактора идеальности  $< 1,5$  и сопоставимых характеристиках нелинейности ВАХ при нулевых напряжениях смещения.
5. Обобщённая эмиссионно-диффузионная теория, учитывающая одновременно туннельные процессы вблизи границы МП и ток инжекции в базовом i-слое, с достаточной точностью описывает ВАХ низкобарьерных диодов Мотта.
6. Низкобарьерные диоды Мотта с  $\delta$ -легированием вблизи границы МП обеспечивают рост чувствительности при детектировании в режиме без тока смещения и эффективное смешение сигналов при пониженной мощности гетеродина.
7. Планарные детекторы на основе микрополосковых щелевых антенн, с включёнными в них низкобарьерными диодами, сохраняют направленность и чувствительность при плотной компоновке в матричном приёмнике.

### **Личный вклад автора**

При выполнении работы автором сделан определяющий вклад в постановку задач исследования электронных транспортных эффектов в микроструктурах металл-полупроводник, развитие методик гетероэпитаксиального роста и селективного легирования структур, анализ и интерпретацию экспериментальных данных, решение модельных теоретических задач.

### **Апробация работы**

Основные результаты были представлены и обсуждены на

- Российской конференции с участием зарубежных учёных «Микроэлектроника-94» (Звенигород, 1994 г.);
- совещаниях «Нанофотоника» (Нижний Новгород - 1999, 2000, 2001, 2003, 2004 г.);
- 8<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> European Workshops on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy (Prague - 1999, Lecce - 2003, Lausanne - 2005);
- International Workshops "Scanning probe microscopy" (Nizhny Novgorod - 2001, 2002, 2003);
- I, II, III, V, VI и VIII Российских конференциях по физике полупроводников (Нижний Новгород - 1993 г., Зеленогорск - 1996 г., Москва - 1997 г., Нижний Новгород - 2001 г., Санкт-Петербург - 2003 г., Екатеринбург - 2007 г.);
- International Symposia "Nanostructures: Physics and Technology" (St.-Petersburg - 1996, 1997);
- International Symposia on Compound Semiconductor (St.-Petersburg - 1996, 1997);
- 10<sup>th</sup> International Conference on Superlattices, Microstructures, and Microdevices (Lincoln, 1997);
- 2<sup>nd</sup> VDE World Micro Technologies Congress - (Munich, 2003);
- международных конференциях "Оптика, оптоэлектроника и технологии" (Ульяновск - 2001, 2002, 2003 г.);
- 4<sup>th</sup> International Conference On Photo-Excited Processes and Applications (Lecce, 2004);
- Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и Информатика" (Зеленоград, 1995 г.);
- совещании "Зондовая микроскопия" (Нижний Новгород, 2000 г.);
- симпозиумах "Нанопизика и наноэлектроника" (Нижний Новгород - 2007, 2008, 2009 г.);

- International Semiconductor Device Research Symposia (Charlottesville - 1993, 1997);
- 8-ой, 11-ой, 15-ой, 16-ой и 17-ой международных микроволновых конференциях "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь - 1998, 2001, 2005, 2006, 2007 г.);
- 7-ой Российской конференции "GaAs-99" (Томск, 1999 г.);
- 23<sup>rd</sup> International Conference on Microelectronics (Nis, 2002);
- Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics (Shanghai, 2006);
- 6<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (Sevastopol, 2007);
- Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2008 г.);
- радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов» (Нижний Архыз, 2008 г.).

### **Публикации**

Основные результаты опубликованы в 83 работах, из них - 49 статей в рецензируемых журналах, 34 работы - в сборниках материалов и трудов конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трёх приложений, списка цитированной литературы (164 наименования) и списка публикаций автора по теме диссертации. Объем диссертации составляет 402 страницы, она содержит 160 рисунков и 11 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, показана ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о структуре и содержании работы.

В **главе 1** обсуждаются возможности метода МОГФЭ [6] по созданию гетероэпитаксиальных микроструктур с тонкими слоями, гладкими интерфейсами, высокой однородностью вдоль поверхности и резким изменением состава и легирования. Эти структуры необходимы для решения основных задач диссертационной работы, связанных с изучением транспортных явлений в контактах МП, где

эффекты туннелирования играют важную или определяющую роль. Описывается базовый технологический инструментарий, включающий методики МОГФЭ, оптический мониторинг процесса МОГФЭ (in situ), новые методики диагностики наноструктур, способы получения различных комбинаций низкодефектных полупроводниковых гетероструктур на основе соединений Al-Ga-In-As-N [A1-A32].

Обсуждаются наиболее существенные особенности установок МОГФЭ. Важным аспектом является совершенная газодинамика реактора, обеспечивающая при выращивании гетероструктур быструю замену парогазовой смеси у подложки. Обсуждаются эксперименты по контролю состояния ростовой поверхности при измерении коэффициента отражения поляризованного света, падающего на неё под углом Брюстера (брюстеровская рефлектометрия). Эти исследования позволили определять количество остаточного мышьяка на поверхности и удалять его без нарушения морфологии. Для гетероструктур InGaAs/GaAs брюстеровская рефлектометрия позволила также контролировать сохранение режима послойного роста, срыв его при образовании квантовых точек и нестационарные процессы сегрегации индия при повышении температуры роста  $T_g > 450^\circ\text{C}$ .

Серьёзное внимание уделено поиску режимов МОГФЭ для формирования атомарно гладких поверхностей и атомарно резких интерфейсов. Обсуждаются причины нарушения планарности поверхности из-за эшелонирования атомных ступеней, релаксации упругих напряжений и генерации дефектов в гетероструктурах типа InGaAs/GaAs. Для контроля шероховатости поверхности использовали методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) поверхности и поперечных сколов гетероструктур. Одновременно проводился поиск режимов МОГФЭ для получения полупроводниковых гетероструктур с резким изменением состава. Резкость гетеропереходов контролировалась методом послойной опико-электронной спектроскопии сверхвысокого (субнанометрового) разрешения - рис.1. Видно, что задний фронт слоя InGaAs является более резким, его ширина для «скользящих» электронов, обеспечивающих лучшее разрешение, составляет  $< 0,8$  нм. Передний профиль более затянут, его ширина составляет  $\sim 1,2 \div 1,4$  нм из-за сегрегации In при относительно высокой температуре роста  $T_g = 600^\circ\text{C}$ .

Предложен оригинальный метод восстановления профиля легирования полупроводников при электрохимическом CV профилировании. Метод дает возможность восстановить профиль легирования

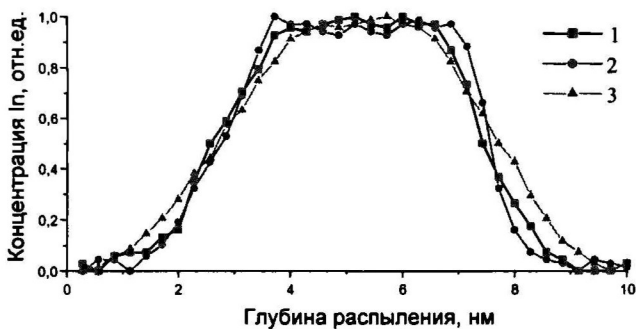


Рис. 1. Распределение атомов In по глубине в гетероструктуре GaAs/InGaAs/GaAs, измеренное при разных углах сбора оже-электронов в энергоанализатор: 1 – сбор во всём телесном угле; 2 – «скользящие» электроны; 3 – «нормальные» электроны.

непосредственно от поверхности полупроводника с высоким пространственным разрешением на масштабах, меньших радиуса дебаевского экранирования. Формально разрешение ограничивается величиной шага травления, который может быть равен нескольким нанометрам. Метод предъявляет повышенные требования к точности измерений и требует совершенствования измерительной аппаратуры.

Важная роль в работе отводится технике  $\delta$ -легирования. Именно с помощью  $\delta$ -легирования GaAs кремнием формируется необходимый потенциальный рельеф туннельных контактов МП, которые изучаются в дальнейшем. Важные параметры – высокая поверхностная концентрация электронов -  $N_\delta$  и предельная резкость в распределении примеси в  $\delta$ -слое. Дельта-слои, выращенные при  $T_g=600^\circ\text{C}$ , имели наибольшие значения  $N_\delta \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и минимальную ширину концентрационных пиков по CV измерениям: 2,5 нм при 300 К и 1,6 нм при 77 К - рис. 2. Эти параметры сопоставимы с лучшими известными данными [7] и согласуются с результатами анализа осцилляционных транспортных эффектов в  $\delta$ -слоях в импульсных магнитных полях до 26 Т при температурах  $T=1,6 \div 4,2 \text{ К}$  [A23].

Проведены исследования глубоких состояний и захвата на них электронов в  $\delta$ -легированном кремнием GaAs с помощью измерений импеданса контакта Шоттки к структуре в зависимости от напряжения и температуры. Выявлены причины насыщения концентрации

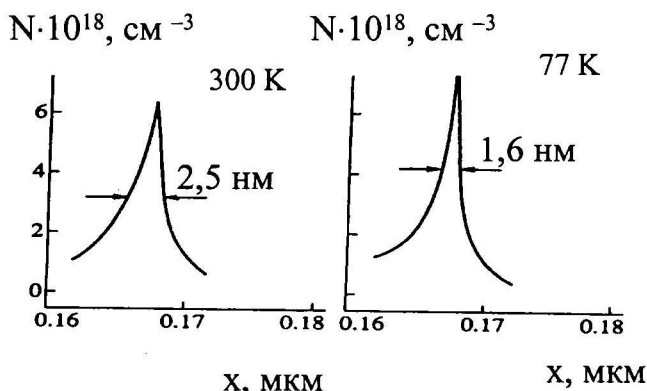


Рис. 2. CV профили концентрации электронов в  $\delta$ -слоях кремния в GaAs, измеренные при 300 и 77 К.

электронов в  $\delta$ -слое на уровне  $N_\delta \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  с ростом поверхностной концентрации кремния  $N_s > N_\delta$ . Показано, что в этих условиях происходит насыщение концентрации электронов, обусловленное автокомпенсацией. В запрещенной зоне появляются хвосты плотности состояний с характерной энергией в интервале 20÷100 мэВ и сечением захвата электронов порядка  $10^{-17} \text{ см}^{-2}$ . Здесь же приведены результаты работ по намеренной генерации глубоких состояний в  $\delta$ -легированных структурах GaAs при их облучении ионами водорода и гелия [A26]. Пороговая доза облучения, необходимая для изоляции  $\delta$ -слоя на уровне  $5 \cdot 10^9 \text{ ом}/\square$ , оказалась в два раза больше, чем для однородно легированного слоя с той же поверхностной концентрацией. Изоляция сохраняется при отжиге структур при температурах менее 400°C. Отжиг при температуре >600°C изменяет тип проводимости на дырочный, подтверждая амфотерный характер примеси Si.

Приведены оптические, аналитические и структурные данные по узкозонным слоям InGaAs, GaAsN и InGaAsN на подложках GaAs [A27-A32]. Добавление In и N в GaAs уменьшает ширину запрещенной зоны, но противоположно влияет на упругие напряжения в структурах. Показана возможность компенсации упругих напряжений в гетероструктурах InGaAsN/GaAs [A31, A32].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что селективно легированные гетероструктуры InGaAsN/GaAs с тонкими слоями нанометровой толщины, выращенные методом МОГФЭ, имеют вы-

сокое качество и могут использоваться для «зонной инженерии» потенциального рельефа в контактах МП.

В главе 2 обсуждаются результаты исследований процессов осаждения Al из металлоорганических соединений (МОС) триметиламиноалана (ТМАО) или диметилэтиламиноалана (ДМЭАО) и лазерного напыления Mo и W на атомарно чистую (ростовую) поверхность GaAs(100) в реакторе МОГФЭ. Изучаются процессы образования металлических нанокластеров Al, Mo и W на поверхности GaAs, последующего эпитаксиального зарастивания нанокластеров полупроводниковыми слоями и формирования многослойных массивов металлических нанокластеров в монокристаллической полупроводниковой матрице GaAs [A33-A44].

Установлено, что при температурах осаждения  $T_g$  от 130 до 360°C формируются чистые слои алюминия, состоящие из зерен различных текстур и эпитаксиальных ориентаций. С увеличением  $T_g$  возрастает структурное совершенство, увеличивается размер зерен и шероховатость поверхности плёнки Al. При  $T_g \leq 240^\circ\text{C}$  получены близкие к идеальным контакты Al/n-GaAs. Они имеют атомарно чистый и гладкий интерфейс, заданный эпитаксиальной поверхностью GaAs, без каких-либо промежуточных слоёв. Удельное сопротивление Al составляет  $5 \div 7$  мкОм см<sup>2</sup>, что близко к объёмному значению, высота барьера Шоттки находится в интервале  $0,7 \div 0,75$  эВ и фактор идеальности  $\leq 1,1$ .

Показано, что на начальных стадиях осаждения Al, Mo и W на поверхности GaAs происходит формирование нанокластеров с латеральными размерами  $10 \div 100$  нм. При их эпитаксиальном зарастивании может реализовываться как механизм роста Фольмера-Вебера, так и послойный рост кристалла. Послойный механизм реализуется, если после формирования нанокластеров Al при  $T_g \leq 500^\circ\text{C}$  закрыть их слоем низкотемпературного GaAs толщиной  $10 \div 20$  нм и только потом прервать рост для повышения температуры до оптимальных значений для GaAs ( $> 600^\circ\text{C}$ ). В этом случае планаризация поверхности GaAs происходит при толщине, сравнимой с высотой нанокластеров. Это подтверждают данные атомно-силовой микроскопии - рис. 3. Видны атомные ступени на начальных стадиях зарастивания - рис. 3б. Важно также, что рельеф и картина токов растекания на рис. 3в соответствуют друг другу, что свидетельствует о наличии металла под возвышениями.



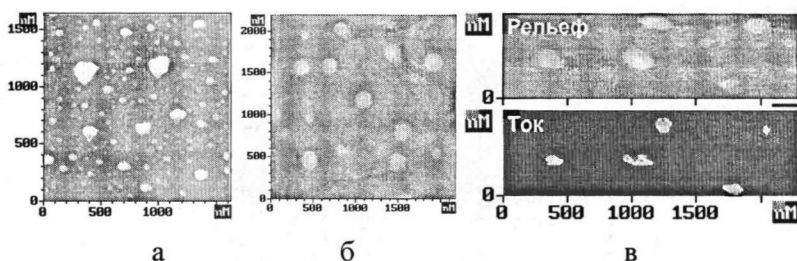


Рис. 3. Изображения в атомно-силовом микроскопе: а) - нанокластеров Al на GaAs; б) – идентичных нанокластеров, покрытых тонким слоем GaAs; в) - участка поверхности, показанной на рисунке (б) в режимах рельефного и токового контрастов.

Такой режим заравнивания сохраняется при гораздо большем количестве осаждённого алюминия, когда размеры островков возрастают до 100 нм и они начинают соприкасаться. Установлено, что верхний полупроводниковый слой имеет низкий уровень структурных дефектов. При встраивании в него квантовой ямы InGaAs, как тест-объекта, наблюдаются характерные спектры фотолюминесценции и рентгеновской дифракции.

В главе 3 рассмотрены теоретические модели, полезные при анализе свойств наноконтактов и многослойных структур с металлическими нанокластерами в полупроводниковой матрице [A45-A47]. Здесь же представлены результаты оптических исследований эпитаксиальной структуры GaAs, имеющей 9 нанокластерных слоёв алюминия [A48,A49].

Рассмотрена модельная задача о свойствах контакта Шоттки между металлической сферой радиуса  $a$  и полупроводником. Показано, что ширина области обеднения вокруг сферического наноконтакта может быть много больше его размеров, что обеспечивает малую величину емкости  $C \sim a \cdot \epsilon$ . Величина критической частоты наноконтакта  $f_{cr} = (2\pi \cdot r \cdot C)^{-1}$  ( $r$  – сопротивление растекания) достигает терагерцового диапазона частот даже при невысоком уровне легирования полупроводника  $N \sim 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что свидетельствует о малой инерционности отклика наноконтакта. Обсуждается влияние кривизны границы раздела МП на величину туннельной компоненты тока. Уменьшение радиуса  $a$  приводит к сужению барьера – рис. 4а. В ВКБ-приближении, с учётом снижения высоты барьера за счёт сил изображения построена теория термополевого (ТП) токопереноса.

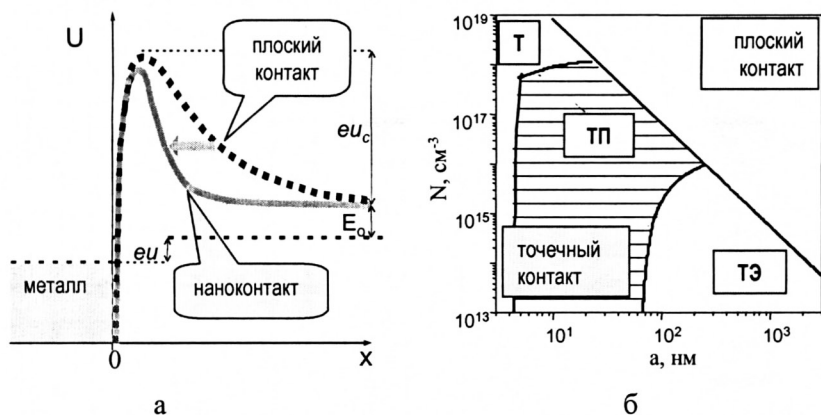


Рис. 4. Форма потенциала для наноконтакта (линия) и плоского контакта (пунктир) - (а); области параметров, отвечающие туннельному - Т, термополевому - ТП и термоэмиссионному - ТЭ механизмам токопереноса при 300 К - (б).

Получены аналитические выражения для ВАХ. Определена область параметров с термополевым механизмом протекания тока – рис. 4б. На противоположных границах этой области термополевой ток сравнивается с термоэмиссионным (ТЭ) и туннельным (Т). При термополевом токопереносе зависимости как прямого, так и обратного тока имеют, в основном, экспоненциальный характер. При уменьшении радиуса наноконтакта снижение эффективной высоты барьера может быть более 0,1 эВ. Для наноконтакта с  $a \sim 10$  нм при  $T=300$  К величины прямого и обратного токов сравниваются, и ВАХ становятся симметричными. Это сохраняется при сколь угодно малом уровне легирования полупроводника.

Рассмотрена модель плотного массива нанокластеров, встроенных в полупроводник. Предполагается, что произошло смыкание металлических нанокластеров и выравнивание электрического потенциала. Проведено теоретическое исследование частотной зависимости адмитанса и нелинейных свойств емкости в таких структурах. Рассмотрена динамика изменения ёмкости структуры при большой амплитуде воздействующего сигнала. Через некоторое время после начала воздействия система переходит в установившийся режим, которому соответствует определенный заряд металлического слоя и емкость системы. После этого заряд металла и емкость не зависят от

мгновенного значения напряжения, а определяются его амплитудой. Следует заметить, что скорость уменьшения емкости в начале переходного процесса может быть более 10% за 1 пс.

Представлены результаты оптических исследований структур GaAs, содержащих 9 нанокластерных слоёв Al. Из измерений спектров фототока определена высота потенциальных барьеров наноконтактов  $\sim 0,76$  эВ. С субпикосекундным временным разрешением изучена кинетика отражения света и фотолюминесценции (ФЛ) после воздействия на многослойную структуру мощного светового импульса, возбуждающего неравновесные носители заряда – рис. 5.

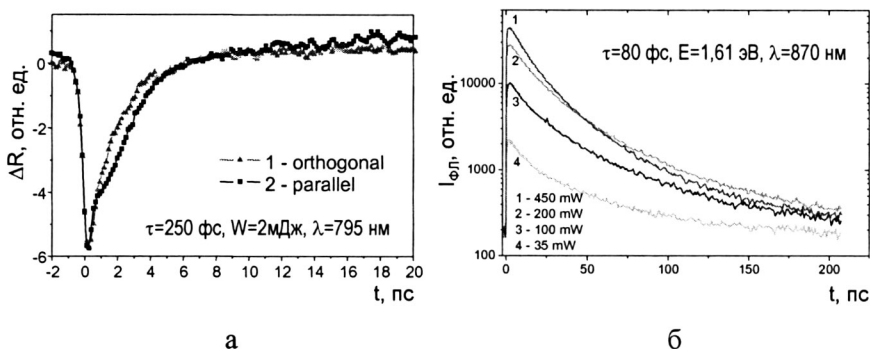


Рис. 5. Темп изменения: (а) - коэффициента отражения  $\Delta R$  при двух различных взаимных поляризациях возбуждающего и зондирующего импульсов; (б) - интенсивности фотолюминесценции при уровнях возбуждения 450 (1), 200 (2), 100 (3) и 35 мВт (4).

Предложена простая модель, описывающая баланс в системе горячих и термализованных неравновесных носителей тока и кинетику изменения оптических сигналов. Быстрое изменение коэффициента отражения (характерное время  $\sim 1$  пс) связано с захватом большего числа носителей на центры безызлучательной рекомбинации, связанные с нанокластерами. Время жизни небольшого числа не захваченных неравновесных носителей составляет  $\sim 15$  пс и определяет темп гашения сигнала ФЛ.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований транспортных процессов в туннельных контактах МП с приповерхностным  $\delta$ -легированием [A50-A64]. Описана

технология изготовления структур на основе Al/GaAs в едином процессе МОГФЭ. Приведены и проанализированы экспериментальные ВАХ структур с модифицированными контактами Мотта. Разработана теоретическая модель, описывающая токоперенос.

Показана возможность управления путём  $\delta$ -легирования вблизи границы МП эффективной высотой барьера  $\Phi_{\text{eff}}$  к n-GaAs(100) при сохранении небольших значений фактора идеальности  $n$ . На рис. 6 схематически показан ход потенциала в контакте Мотта с  $\delta$ -легированием и приведены данные экспериментов и численных расчётов для величин  $\Phi_{\text{eff}}$  и  $n$  в контактах на основе Al/ $\delta$ (Si)-GaAs.

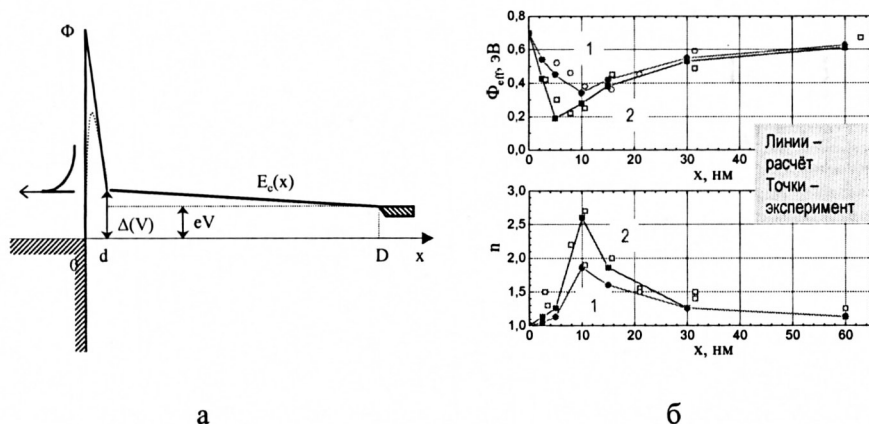


Рис. 6. Профиль потенциала в контакте Мотта – (а); эффективная высота барьера  $\Phi_{\text{eff}}$  и фактор идеальности  $n$  в зависимости от глубины залегания  $\delta$ -слоя с концентрацией  $N_s$ ,  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ : 1 - 4, 2 - 8.

На основе подхода Мерфи и Гуда [8] была решена задача о туннелировании в контактах МП с изотипным  $\delta$ -легированием. При полном обеднении  $\delta$ -слоя, как показано на рис. 6а, получено аналитическое выражения для плотности тока

$$j(V) = A^* T^2 \cdot \frac{\exp(-b)}{1 - kT \cdot c} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta(V)}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right], \quad (1)$$

справедливое при высокой туннельной прозрачности барьера [A56]. Коэффициенты  $b$  и  $c$ , слабо зависящие от напряжения, определяют уменьшение постоянной Ричардсона  $A^*$ . Сравнение с экспериментом показывает, что теория даёт лишь качественное описание ВАХ.

Для выяснения причин расхождения теории и эксперимента был развит феноменологический подход к диагностике параметров низкобарьерных диодов, основанный на анализе зависимости дифференциального сопротивления диода от напряжения  $R_d(V)$ . Проведённое исследование показало, что для точного и полного описания ВАХ диода нужно учитывать последовательно включенный  $n$ - $p^+$ -переход и пространственный заряд инжектированных электронов.

Была решена задача о токопереносе в контактах Мотта при учёте пространственного заряда в  $i$ -слое. Получены аналитические выражения для потенциала, ёмкости и тока. Основным допущением было пренебрежение током инжекции и объёмным легированием  $i$ -слоя. В сравнении с классическим результатом Мотта [9], учёт пространственного заряда замедляет рост тока при прямом смещении и уменьшает нелинейность ВАХ. Инжекция носителей тока в  $i$ -слой приводит к резкому возрастанию ёмкости контакта.

В дрейфово-диффузионном приближении было получено аналитическое решение задачи об инжекции носителей тока в  $i$ -слой при самосогласованных граничных условиях на контактах и при учёте самого тока инжекции. Такое решение описывает одновременно контактные и объёмные инжекционные эффекты и позволяет рассчитать потенциал, электрическое поле и ВАХ во всём диапазоне напряжений для целого ряда структур с любой комбинацией металлических и полупроводниковых контактов, в том числе имеющих гетеробарьеры, препятствующие инжекции электронов. Ранее для этого использовались различные приближения [10]. В частности, при больших токах из решения следует закон Мотта-Герни [10]. Пример расчёта прямых ветвей ВАХ контактов Мотта показан на рис. 7а. Для сравнения приведены результаты [А63], полученные численно в квазигидродинамической модели, учитывающей эффекты горячих электронов и нестационарные транспортные явления. Видно, что аналитическое решение, в основном, правильно описывает ток.

Полученные решения позволили сформулировать обобщённый эмиссионно-диффузионный подход к вычислению тока в низкобарьерных контактах Мотта. Учитываются туннельные процессы на границе МП и эффекты пространственного заряда в базовом  $i$ -слое. На рис. 7б приведены ВАХ: кривая 1 – расчёт на основе (1) с учетом пространственного заряда, 2 – дополнительно учитывается вырождение электронов в контактах, 3 – эксперимент, 4 – при использовании статистики Ферми в контактах и в  $i$ -слое. Для обратной ветви

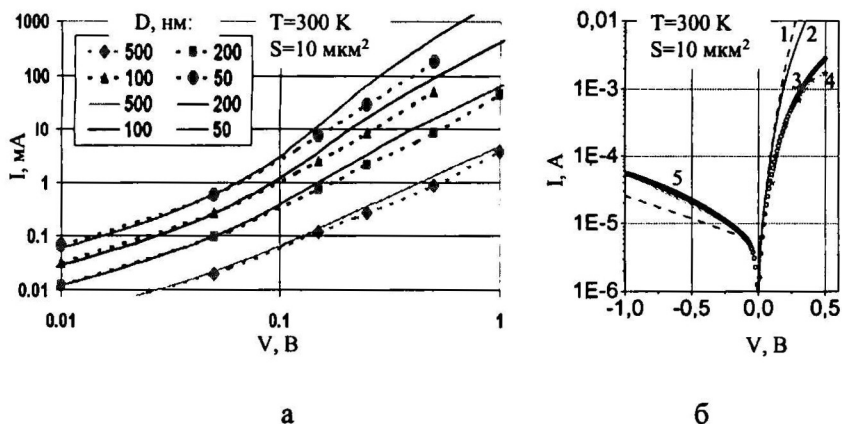


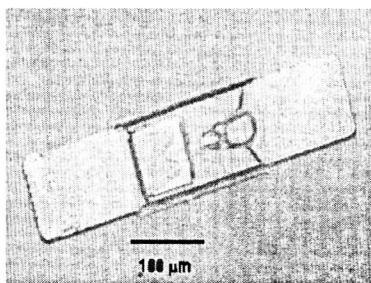
Рис. 7. ВАХ: (а) - диодов Мотта с барьером  $\Delta=0,23$  эВ и толщиной i-слоя  $D$  – 50, 100, 200, 500 нм (линии – решение, пунктир - численный расчёт); (б) - низкобарьерных диодов при  $\Phi=0,7$  эВ,  $d=4,7$  нм,  $N_s=8,8 \cdot 10^{12}$  см $^{-2}$ ,  $D=100$  нм, (1, 2, 4, 5 – расчёты, 3 – эксперимент).

ВАХ все способы вычисления тока дают результат (5), близкий к данным эксперимента, если учесть дополнительный туннельный ток через основание туннельного барьера при энергиях  $E < \Delta$  (рис. 6а).

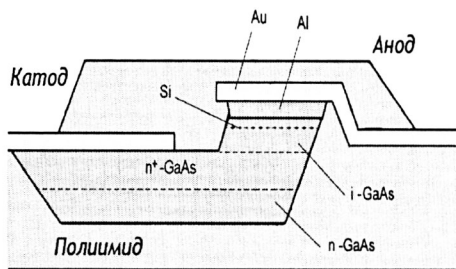
Глава 5 посвящена применению низкобарьерных диодов с  $\delta$ -легированием для создания новых высокочувствительных микроволновых детекторных и смесительных приёмников [А65-А83]. Значительное внимание уделяется разработке простых планарных приёмных систем, перспективных для реализации радиовидения в миллиметровом диапазоне длин волн в реальном масштабе времени.

Описаны методы и базовые технологии изготовления планарных смесительных и детекторных диодов. Приведены результаты работ по введению в структуру дополнительных гетерослоёв, облегчающих изготовление диодов с субмикронными размерами анода.

Отработаны технологические приёмы изготовления планарных диодов с пониженной высотой барьера. Изготовлены планарные диоды с площадью анода  $S \approx 10$  мкм $^2$ , малой удельной ёмкостью  $< 1$  фФ/мкм $^2$  и значениями дифференциального сопротивления  $R_d(0)=0,4 \div 1000$  кОм. На рис. 8 приведена микрофотография диода и эскиз его поперечного сечения. Диоды имеют малую ёмкость  $C \leq 15$  фФ и последовательное сопротивление  $r \leq 15$  Ом.



а



б

Рис. 8. Микрофотография низкобарьерного планарного диода – (а) и схематичное изображение его поперечного сечения плоскостью, проходящей через анодный контакт – (б).

Представлены результаты экспериментов по детектированию излучения коротковолновой части миллиметрового диапазона в волноводных камерах с низкобарьерными диодами Мотта. Изложены принципы и методики измерения основных характеристик детекторов: вольт-ваттной чувствительности  $\gamma$  и минимальной обнаружимой мощности NEP. Проведено сопоставление характеристик детекторов на основе диодов с пониженной и обычной высотой барьера. При детектировании сигналов в волноводной камере в широкой полосе  $80 \div 140$  ГГц получены значения  $\gamma > 1000$  В/Вт и  $NEP < 10^{-11}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ . Лучшие значения параметров на выделенных частотах этого диапазона  $\gamma \approx 5000$  В/Вт,  $NEP \approx 3 \div 6 \cdot 10^{-12}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ . При использовании оптимизированной платы согласования в радиометре трехмиллиметрового диапазона получены значения  $\gamma > 10000$  В/Вт в полосе  $76 \div 105$  ГГц. Это соответствует рекордным результатам для неохлаждаемых диодных детекторов этого диапазона.

Изучены шумовые характеристики низкобарьерных диодов, существенные для детектирования сигналов. Определена зависимость фактора Фано для дробовых шумов диода в зависимости от протекающего через него тока. Фактор Фано уменьшается с ростом тока смещения и при токах более 1 мА приближается к значению 1, свидетельствующему о дробовом характере шума. При стремлении тока к нулю шумы диодов приобретают тепловой характер, и их спектральная плотность согласуется с формулой Найквиста.

Были проанализированы принципы построения планарных детекторов миллиметрового диапазона длин волн на основе низкобарьерных диодов, включенных в планарные щелевые антенны. Рассмотрены основные задачи по выбору и разработке конструкции антенны, согласованной с низкобарьерным диодом, и по оптимизации параметров низкобарьерных диодов для достижения максимума чувствительности. Описана конструкция щелевой антенны на фольгированном диэлектрике Rodgers с низкой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 2,2$  и толщиной 0,5 мм – рис. 9. Внешние размеры антенны сравнимы с длиной волны  $\lambda$ . Она располагается на слое диэлектрика ограниченных размеров. Значения ширины диаграммы направленности по половине мощности в главных плоскостях почти равны (приблизительно  $44^\circ$  и  $47^\circ$ ), коэффициент усиления  $G_r \approx 14,5$ , волновое сопротивление  $R_a \approx 800$  Ом, средняя частота  $f = 94$  ГГц и полоса  $\Delta f_{3\text{дБ}} \approx 8$  ГГц. Антенны обеспечивают достаточно высокую направленность и эффективность за счет малых потерь мощности на возбуждение поверхностных волн.

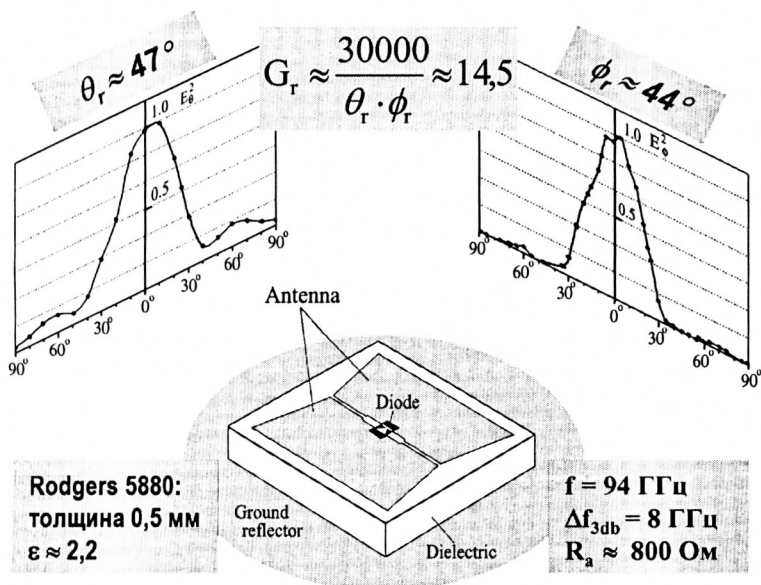


Рис. 9. Схематичное изображение планарного детектора и его диаграммы направленности в главных плоскостях.



Исследованы характеристики детектирования для диодов с  $R_d$  в диапазоне  $0,4 \div 1000$  кОм – рис. 10.

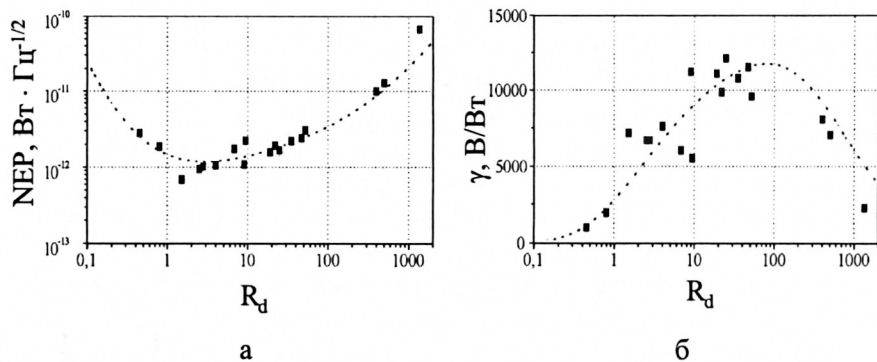


Рис. 10. Экспериментальные (точки) и теоретические (пунктир) зависимости  $\gamma$  (а) и NEP (б) планарных детекторов от  $R_d$ .

Проведено сопоставление с расчётами в простой модели детектора:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{R_d}{r + R_d + R_l} \cdot \frac{(1 - |\Gamma^2|) \cdot R_d}{(1 + r/R_d) \cdot (1 + f^2/f_c^2)}, \quad (2)$$

$$\text{NEP} = \langle V_n \rangle / \gamma, \quad (3)$$

$$f_c = \frac{(1 + r/R_d)^{1/2}}{2\pi \cdot C \cdot (r \cdot R_d)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\langle V_n \rangle^2 = 4 \cdot kT \cdot \Delta f \cdot (r + R_d), \quad (5)$$

где  $\alpha = R_d \cdot d^2 I / dV^2$  - параметр нелинейности ВАХ,  $\langle V_n \rangle$  – среднее значение амплитуды теплового шума диода в полосе частот  $\Delta f$ , фактор  $(1 - |\Gamma^2|)$  учитывает согласование диода с антенной,  $R_l$  – сопротивление нагрузки детектора,  $r \approx 10$  Ом и  $C \approx 15$  фФ. Видно, что теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются. Значения  $\gamma > 10000$  В/Вт достигаются для диодов с  $R_d = 20 \div 100$  кОм при  $\text{NEP} \approx 2 \cdot 10^{-12}$  Вт  $\text{Гц}^{-1/2}$ . Лучшие значения  $\text{NEP} \approx 10^{-12}$  Вт  $\text{Гц}^{-1/2}$  отвечают  $\gamma \approx 7000$  В/Вт при  $R_d = 2 \div 6$  кОм.

Для продвижения в область более высоких частот рассматривается возможность создания планарного детектора непосредственно на основе полуизолирующей подложки GaAs с высокой диэлектри-

ческой проницаемостью  $\epsilon \approx 13$ . Приведены результаты численного моделирования и измерения параметров таких детекторов в диапазоне 94÷97 ГГц. Коэффициент направленного действия антенны снижается до 10, величина  $\gamma$  - примерно в два раза ниже, чем для диэлектрика Rodgers. Тем не менее, это свидетельствует о перспективности разработки интегральных планарных детекторов на GaAs.

Показана возможность построения матрицы планарных детекторов с компактным расположением в плоскости (период -  $3\lambda/2$ ) при слабом взаимном влиянии. Для подавления боковых лепестков и минимизации взаимного влияния антенн использованы штыри, смонтированные на металлическом экране. Изготовлена приёмная линейка из восьми планарных детекторов, расположенных в ряд с периодом  $3\lambda/2$ . С помощью пошагового перемещения линейки в плоскости получены изображения различных предметов при их просвечивании излучением с частотой 94 ГГц. Лучшие значения разрешения составили  $\sim 2\lambda$  при минимальных расстояниях от объекта до плоскости сканирования и шагах перемещения  $3\lambda/4$ .

Описаны практически важные характеристики планарных детекторов – динамический диапазон, температурные и частотные зависимости параметров. Предложены пути оптимизации диодов для увеличения рабочих частот и повышения чувствительности планарных детекторов.

Приведены данные по смещению сигналов с частотами около 94 ГГц (промежуточная частота 700 МГц) на низкобарьерном диоде, включённом в планарную антенну. Лучшие результаты показали диоды с  $R_d \approx 3 \div 9$  кОм: потери преобразования составили 16÷12,5 дБ при существенно меньших значениях мощности гетеродина (10÷40 мкВт), в сравнении с обычными смесительными диодами.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложении 1** обсуждается точность восстановления профиля легирования полупроводников на основе CV измерений в процессе электрохимического травления [A20].

**Приложение 2** – это описание свойств математической функции, возникающей при анализе туннелирования в наноконтактах и имеющей связь с функцией Аппеля.

**Приложение 3** содержит обобщение решения задачи инжекции носителей тока в изолирующий слой для структур с металлическими и вырожденными полупроводниковыми контактами.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Развита метод брестерской рефлектометрии, предназначенный для оптического мониторинга в реальном масштабе времени газовой фазы и ростовой поверхности полупроводников  $\text{As}_2\text{S}_3$  с монослоевым разрешением в условиях МОГФЭ. Оптические измерения позволяют оценить: характерные времена процессов пиролиза арсина и десорбции мышьяка; темп сегрегации индия и нарушения морфологии поверхности.
2. Проведены исследования планарности интерфейсов, дефектообразования и резкости гетеропереходов в структурах  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ . Установлено, что при увеличении толщины слоев  $\text{InGaAs}$  критерием образования дислокаций служит резкий рост шероховатости поверхности структуры. Снижение температуры роста с 600 до 500°C и использование подложек  $\text{GaAs}(100)$  с малым углом разориентации ( $\leq 0,2^\circ$ ) приводит к увеличению критической толщины слоя  $\text{In}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$  от 5 до 10 нм. Данные послойного оже-анализа свидетельствуют о формировании атомарно резких гетеропереходов с протяжённостью меньше предельных значений разрешения данного метода:  $0,5 \pm 0,8$  нм.
3. Методом МОГФЭ получены атомарно резкие профили распределения примеси при  $\delta$ -легировании кремнием слоев  $\text{GaAs}$ , о чём свидетельствуют данные CV профилирования: характерный масштаб области локализации электронов составляет 2,5 нм (при 300 К) и 1,6 нм (при 77 К). При поверхностной концентрации атомов Si более  $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  происходит насыщение концентрации электронов, обусловленное автокомпенсацией, и в запрещенной зоне появляются хвосты плотности состояний протяжённостью  $20 \div 100$  мэВ и сечением захвата электронов около  $10^{-17} \text{ см}^{-2}$ .
4. Исследованы закономерности осаждения алюминия на атомарно чистую поверхность  $\text{GaAs}$  при пиролизе МОС (ТМАА и ДМЭ-АА) в реакторе МОГФЭ. При температурах  $150 \div 200^\circ\text{C}$  формируются чистые и гладкие плёнки Al с электрическими свойствами, соответствующими характеристикам объёмного материала. На границе отсутствуют промежуточные слои и параметры контактов Шоттки Al/n-GaAs близки к идеальным: высота барьера  $\sim 0,7$  эВ, фактор идеальности  $1,02 \div 1,06$ .
5. Показано, что при пиролизе МОС Al и лазерном распылении Mo и W на поверхности  $\text{GaAs}$  на начальных стадиях происходит

формирование металлических нанокластеров с латеральными размерами  $10\div 100$  нм. Послойный механизм их зарастивания реализуется, если сразу после формирования нанокластеров закрыть их тонким слоем низкотемпературного GaAs толщиной  $10\div 20$  нм, и только потом прервать рост для повышения ростовой температуры до оптимальных значений для GaAs. В этом случае планаризация поверхности слоя GaAs происходит при толщине, сравнимой с высотой нанокластеров, что позволяет формировать плотные многослойные массивы нанокластеров.

6. Проведены модельные расчёты электрических свойств наноконтактов Шоттки. Для наноконтактов малого радиуса ( $\leq 10$  нм) возрастает туннельная компонента тока, уменьшается эффективная высота барьера и сравниваются токи прямой и обратной ветвей ВАХ. Ширина области обеднения полупроводника вокруг нанокластера или массива нанокластеров может быть много больше их размеров. Это приводит к малой ёмкости и малой инерционности процессов перезарядки нанокластеров и выраженным нелинейным емкостным эффектам вплоть до терагерцевых частот.
7. Экспериментальные исследования кинетики отражения и фотолюминесценции в GaAs с нанокластерами Al позволяют оценить время жизни неравновесных носителей  $\sim 15$  пс и время релаксации проводимости  $\sim 1$  пс. Гашение фотолюминесценции связано с временем жизни неравновесных носителей. Эволюция во времени коэффициента отражения определяется релаксацией проводимости из-за захвата неравновесных носителей на центры безызлучательной рекомбинации, обусловленные встроенными в GaAs нанокластерами. Предложена простая модель, которая количественно описывает кинетику фотолюминесценции и качественно - эволюцию во времени коэффициента отражения.
8. Разработан способ уменьшения эффективной высоты потенциального барьера контакта МП за счёт увеличения туннельной компоненты тока. При  $\delta$ -легировании кремнием GaAs вблизи границы с Al эффективная высота барьера снижается от 0,7 до 0,2 эВ при значениях фактора идеальности  $< 1,5$ . При высокой поверхностной концентрации кремния  $\sim 10^{13}$  см $^{-2}$  получены омические контакты к n-GaAs с сопротивлением  $< 10^{-5}$  Ом·см $^2$ .

9. В дрейфово-диффузионном приближении получено аналитическое решение задачи об инжекции носителей тока в изолирующий  $i$ -слой, учитывающее одновременно контактные явления на границах и инжекционные токи в объёме. Решение позволяет рассчитать потенциал, электрическое поле и ВАХ во всём диапазоне напряжений для целого ряда структур с металлическими и полупроводниковыми контактами, в том числе при наличии на границах гетеробарьеров, препятствующих инжекции.
10. Построена обобщённая теория туннельного и дрейфово-диффузионного токопереноса в низкобарьерных контактах Мотта с  $\delta$ -легированием вблизи границы МП. Подход позволяет с достаточной точностью описать ВАХ низкобарьерных диодов.
11. На основе микроструктур  $\text{Al}/(\text{In})\text{GaAs}-\delta(\text{Si})-\text{GaAs}$  изготовлены планарные низкобарьерные диоды с площадью анода  $\sim 10 \text{ мкм}^2$ , малой удельной ёмкостью  $< 1 \text{ фФ/мкм}^2$  и значениями дифференциального сопротивления в диапазоне  $0,4 \div 1000 \text{ кОм}$ . Применение низкобарьерных диодов в волноводных и планарных конструкциях детекторов миллиметрового диапазона длин волн без использования постоянного смещения минимизирует собственные шумы диода и обеспечивает рост чувствительности. Лучшие характеристики в диапазоне 94 ГГц: детектирование:  $\text{NEP} \sim 10^{-12} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$ ,  $\gamma > 10000 \text{ В/Вт}$ ; смещение: потери преобразования  $16 \div 12,5 \text{ дБ}$  при пониженной мощности гетеродина  $10 \div 40 \text{ мВт}$ .
12. Разработаны планарные детекторы диапазона  $\lambda \approx 3 \text{ мм}$  на основе микрополосковых щелевых антенн, с включёнными в них низкобарьерными диодами. Антенны изготовлены на основе фольгированных диэлектриков ( $\epsilon = 2,2$ ), имеют внешние размеры  $\sim \lambda$  и обеспечивают низкий уровень боковых лепестков в диаграмме направленности. Показана возможность их плотной компоновки при слабом взаимовлиянии. Изготовлена линейка из 8 планарных детекторов на 94 ГГц, расположенных в ряд с периодом  $3\lambda/2$ . При просвечивании различных объектов излучением с частотой 94 ГГц регистрировалась интенсивность прошедшего поля путём механического перемещения линейки детекторов в плоскости с шагом  $3\lambda/2$  или  $3\lambda/4$ . Получены поляризационно-чувствительные изображения объектов, картины дифракции и интерференции. Лучшие значения разрешения составили  $\sim 2\lambda$ .

### **Цитированная литература**

1. Gregory S. High resistivity annealed low-temperature GaAs with 100 fs lifetimes / S. Gregory, C. Baker, W.R. Tribe, M.J. Evans, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, M. Missous // *Applied Physics Letters*. – 2003. - V. 83. - N 20. - P. 4199-4201.
2. Kadow C. Self-assembled ErAs islands in GaAs for optical-heterodyne THz generation / C. Kadow, A.W. Jackson, A.C. Gossard // *Applied Physics Letters*. – 2000. - V. 76. - N 24. - P. 3510-3512.
3. Su N. Sb-Heterostructure Millimeter-Wave Detectors With Reduced Capacitance and Noise Equivalent Power / N. Su, R. Rajavel, P. Deelman, J.N. Schulman, and P. Fay // *IEEE Electron Devices Letters*. – 2008. – V. 29. – N 6. – P. 536-539.
4. Lynch J.J. Passive Millimeter Wave Imaging Module With Preamplified Zero-Bias Detection / J.J. Lynch, H.P. Moyer, J.H. Schaffner, Y. Royter, M. Sokolich, B. Huges, Y.J. Yoon, J.N. Schulman // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. – V. 56. – N 7. – P. 1592-1600.
5. Brown E.R. Fundamentals of Terrestrial Millimeter-Wave and THz Remote Sensing / E.R. Brown // *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. – 2003. – V. 13. – N 4. – P. 995-1097.
6. Stringfellow G.B. Organometallic Vapour-Phase Epitaxy: Theory and Practice / G.B. Stringfellow // Boston: Academic Press. – 1989. – 398 P.
7. Delta Doping of Semiconductors / Ed. by E.F. Schubert/ - Cambridge: Cambridge University Press. – 1996. – 616 P.
8. Модинос А. Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия / А. Модинос // М.: Наука, 1990. – 320 С.
9. Mott N.F. The theory of crystal rectifiers / N.F. Mott // *Proc. Roy. Soc.* – 1939. - A 171. – P. 27-38.
10. Ламперт М. Инжекционные токи в твердых телах / М. Ламперт, П. Марк // М.: Мир. – 1973. - 416 С.

### **Список публикаций по теме диссертации**

- A1. Данильцев В.М. Применение метода Брюстеровской рефлектометрии для контроля состояния поверхности GaAs в MOCVD реакторе атмосферного давления / В.М. Данильцев, А.Ю. Лукьянов, М.А. Новиков, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // *Заводская лаборатория (диагностика материалов)*. – 1995. - № 10. - С. 16-19.

- A2. Vostokov N.V. Surface photoabsorption monitoring of the strain induced 2D-3D growth mode transition in MOVPE of InGaAs on GaAs (001) / N.V. Vostokov, V.M. Danil'tsev, M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, A.Yu. Lukyanov, D.G. Revin, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin // Proceedings of 8<sup>th</sup> European Workshop on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy and Related Growth Techniques. Prague, June 8-11, 1999. - P. 349-352.
- A3. Востоков Н.В. Применение метода Брюстеровской рефлектометрии для анализа процессов на ростовой поверхности InGaAs в условиях МОСVD / Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, А.Ю. Лукьянов, Д.Г. Ревин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Известия РАН, Серия физическая. – 2000. - Т. 64. - № 2. - С.370-373.
- A4. Дроздов Ю.Н. Сегрегация индия при выращивании квантовых ям InGaAs/GaAs в условиях газофазной эпитаксии / Ю.Н. Дроздов, Н.В. Байдусь, Б.Н. Звонков, М.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2003. - Т. 37. – В. 2. - С. 203-208.
- A5. Vostokov N.V. Investigation of InGaAs based double quantum well heterostructures near the critical thickness transition / N.V. Vostokov, D.M. Gaponova, V.M. Daniltsev, Yu.N Drozdov, A.V. Murel, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin, I.Yu. Shuleshova // Physics of Low-Dimensional Structures. –2001. – N 3/4. - P. 303-308.
- A6. Востоков Н.В. Исследование структур со сдвоенными слоями InGaAs вблизи перехода через критическую толщину / Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Микросистемная техника. - 2001.- № 12. - С. 18-22.
- A7. Fedirko V.A. Characterization of GaAs/GaAlAs MOCVD superlattice by STM/AFM technique / V.A. Fedirko, V.A. Bykov, M.D. Eremtchenko, V.M. Danilt'zev, V.I. Shashkin // Abstracts of Invited Lectures and Contributed Papers of International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology". St.-Petersburg, Russia, June 24-28, 1996. - P. 381-384.
- A8. Fedirko V.A.  $\text{Al}_x\text{B}_5$  structure characterization by scanning probe microscopy / V.A. Fedirko, M.D. Eremtchenko, V.M. Daniltzev, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin // 23<sup>rd</sup> International Symposium on Compound Semiconductor. St.-Petersburg, Russia, September 23-27, 1996. Inst. Phys. Conf. Ser. - N 155. - P. 949-952.

- A9. Pakhomov G.L. AFM Study of Dry Etched Cleavages of the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  heterostructures / G.L. Pakhomov, N.V. Vostokov, V.M. Daniltsev, V.I. Shashkin // Physics of Low-Dimensional Structures. – 2002. - N 5/6. - P. 247-254.
- A10. Shashkin V. Cross-sectional AFM of GaAs-based multiplayer heterostructure with thin AlAs marks / V. Shashkin, N. Vostokov, V. Daniltsev, Yu. Drozdov, G. Pakhomov // Booklet of Extended Abstracts of 10<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy. Italy, Lecce, June 8-11, 2003. - P. 171-173.
- A11. Drozdov Yu.N. Cross-Sectional AFM of GaAs-based Multilayer Heterostructure with Thin AlAs Marks / Yu.N. Drozdov, V.M. Daniltsev, N.V. Vostokov, G.L. Pakhomov, V.I. Shashkin // Physics of Low-Dimensional Structures. – 2003. – N 3/4. -P. 49-54.
- A12. Shashkin V.I. Selective plasma etching III-V multilayer heterostructures / V.I. Shashkin, G.L. Pakhomov, N.V. Vostokov, V.M. Danil'tsev, Y.N. Drozdov, S.A. Gusev // Proceedings 2<sup>nd</sup> VDE World Micro Technologies Congress - MICRO.tec 2003, Munich, Germany. October 13-15, 2003. P. 463-465.
- A13. Дроздов М.Н. Послойный оже-анализ сверхвысокого разрешения: проблема минимизации аппаратных погрешностей / М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Н.Н. Салащенко, Н.И. Полушкин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Письма в ЖТФ. – 1995. - Т. 21. - В. 18. - С. 1-7.
- A14. Дроздов М.Н. Сверхвысокое разрешение при послойном оже-анализе гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с глубоко залегающими квантовыми ямами / М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Письма в ЖТФ. – 1996. - Т. 22. - В. 18. - С. 61-66.
- A15. Дроздов М.Н. Субнанометровое разрешение по глубине при послойном анализе с использованием скользящих оже-электронов / М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Письма в ЖТФ. – 2001. - Т. 27. - В. 3. - С. 59-66.
- A16. Дроздов М.Н. Новый метод определения резкости гетеропереходов  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  при послойном оже-анализе / М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Письма в ЖТФ. – 2001. - Т. 27. - В. 20. - С.51-56.



- A17. Шашкин В.И. Простой метод восстановления тонкой структуры легирования полупроводников из C-V измерений в электрохимической ячейке / В.И. Шашкин, И.Р. Каретникова, А.В. Мурель, И.М. Нефёдов, И.А. Шерешевский // Физика и техника полупроводников. – 1997. - Т. 31. - В. 8. - С. 926-930.
- A18. Нефёдов И.М. Численный метод определения профиля легирования полупроводников по данным C-V измерений при электрохимическом травлении / И.М. Нефёдов, И.Р. Каретникова, А.В. Мурель, В.И. Шашкин, И.А. Шерешевский // Тезисы докладов III Российской конференции по физике полупроводников, "Полупроводники-97". Москва, 1-5 декабря 1997 г. - С. 113.
- A19. Shashkin V.I. Approach to Electrochemical C-V Profiling in Semiconductor with Sub-Debye-Length Resolution / V.I. Shashkin, I.R. Karetnikova, A. Murel, I. Nefedov, I.A. Shereshevskii // IEEE Transactions on Electron Devices. 2000. – V. 47. – N 6. - P. 1221-1224.
- A20. Каретникова И.Р. О точности восстановления профиля легирования полупроводников на основе вольт-фарадных измерений в процессе электрохимического травления / И.Р. Каретникова, И.М. Нефёдов, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2001. - Т. 35. - В. 7. - С. 801-807.
- A21. Данильцев В.М. Получение предельно резких профилей  $\delta$ -легированных слоев GaAs в процессе металлоорганической газофазной эпитаксии / В.М. Данильцев, И.В. Ирин, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Тезисы докладов I Российской конференции по физике полупроводников. Нижний Новгород, 10-14 сентября 1993 г. - Т. 2, С. 355.
- A22. Данильцев В.М. Получение предельно резких профилей распределения примесей в  $\delta$ -легированных слоях GaAs при металлоорганической газофазной эпитаксии / В.М. Данильцев, И.В. Ирин, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Неорганические материалы. – 1994.- Т. 30. - № 8. -С. 1026-1029.
- A23. Германенко А.В. Характеризация  $\delta$ -легированных слоёв GaAs с использованием сильных магнитных полей / А.В. Германенко, Г.М. Миньков, С.А. Негашев, О.Е. Рут, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, В.М. Данильцев // Материалы совещания "Нанопотери", Нижний Новгород, 20-23 марта 2000 г. - С. 78-79.

- A24. Aleshkin V.Ya. Band tailing in Si delta-doped GaAs / V.Ya. Aleshkin, V.M. Danil'tsev, A.V. Murel, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin // Abstracts of Invited Lectures and Contributed Papers of International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology". St.-Petersburg, Russia, June 23-27, 1997. - P. 224-226.
- A25. Алёшкин В.Я. Глубокие состояния в  $\delta$ -легированном кремнием GaAs // В.Я. Алёшкин, В.М. Данильцев, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 1998. - Т. 32. - В. 6. - С. 733-738.
- A26. Danilov I. Electrical isolation of a silicon  $\delta$ -doped layer in GaAs by ion irradiation / I. Danilov, J.P. de Souza, H. Boudinov, A.V. Murel, V.M. Danil'tsev, V.I. Shashkin // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 75. – N 13. - P. 1917-1919.
- A27. Алёшкин В.Я. Характеризация электрофизическими и оптическими методами гетероструктур GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с квантовыми точками / В.Я. Алёшкин, Д.М. Гапонова, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, З.Ф. Красильник, А.В. Мурель, А.В. Парамонов, Д.Г. Ревин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 1998. - Т. 32. - В. 1. - С. 111-116.
- A28. Aleshkin V.Ya. Optical diagnostics of quantum dots in GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  heterostructures / V.Ya. Aleshkin, S.A. Gusev, V.M. Danil'tsev, M.N. Drozdov, O.I. Khrykin, Z.F. Krasil'nik, D.G. Revlin, V.I. Shashkin // Physics of Low-Dimensional Structures. – 1998. – N 1/2. - P. 143-148.
- A29. Гапонова Д.М. Структурные и оптические свойства слоёв  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ , выращенных методом металлоорганической газовой эпитаксии / Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Г. Ревин, А.Б. Толстогузов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Известия РАН. Серия физическая. – 2000. – Т. 64. - № 2. - С. 358-361.
- A30. Данильцев В.М. Оптические и электрофизические свойства эпитаксиальных слоёв  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ , выращенных на GaAs методом МОГФЭ / В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, Д.Г. Ревин, Д.М. Гапонова // Известия РАН. Серия физическая. – 2002. – Т. 66. - № 2. - С. 193-195.
- A31. Мурель А.В. Исследование квантовых ям GaInNAs-GaAs, выращенных методом МОГФЭ / А.В. Мурель, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, Д.М. Гапонова, О.И. Хрыкин,

- В.И. Шашкин // Известия РАН. Серия физическая. – 2004. – Т. 68. - № 1. - С. 87-89.
- A32. Данильцев В.М. Влияние параметров процесса МОГФЭ на свойства эпитаксиальных плёнок GaInAsN / В.М. Данильцев, Д.М. Гапонова, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, Д.А. Пряхин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – В. 1. – С. 13-16.
- A33. Гусев С.А. Осаждение алюминия на эпитаксиальный арсенид галлия в едином МOCVD процессе с использованием триметиламинала / С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Тезисы докладов конференции Микроэлектроника-94. Звенигород, 28 ноября - 3 декабря 1994 г. - С. 267-268.
- A34. Данильцев В.М. Осаждение плёнок алюминия на арсенид галлия в процессе металлоорганической газофазной эпитаксии с использованием триметиламинала / В.М. Данильцев, С.А. Гусев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, Б.М. Булычев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 1996. - № 1. - С. 36-41.
- A35. Данильцев В.М. Получение высококачественных слоев AlGaAs методом металлоорганической газофазной эпитаксии с использованием триметиламинала / В.М. Данильцев, С.А. Гусев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, Б.М. Булычев // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и информатика". Москва, 15-17 ноября 1995 г. - С. 161.
- A36. Shashkin V. Microstructure and Properties of Aluminum Contacts Formed on GaAs(100) by Low Pressure Chemical Vapor Deposition with Dimethylethylamine Alane Source / V. Shashkin, S. Rushworth, V. Daniltsev, A. Murel, Yu. Drozdov, S. Gusev, O. Khrykin, N. Vostokov // Journal of Electronic Materials. – 2001. – V. 30. – N 8. - P. 980-986.
- A37. Daniltsev V.M. A new approach to AFM investigation of buried Al/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs interfaces and quantum dots / V.M. Daniltsev, M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin, I.Yu. Shuleshova, N.V. Vostokov // Physics of Low-Dimensional Structures. – 2001. – N 3/4. - P. 321-326.

- A38. Востоков Н.В. Применение селективного химического травления для исследования заросших слоёв и самоорганизованных квантовых точек в гетероструктурах Al/InGaAs/GaAs методом атомно-силовой микроскопии / Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин, И.Ю. Шулешова // Микросистемная техника. – 2001. - № 11. - С. 35-37.
- A39. Востоков Н.В. Формирование и исследование металлических нанобъектов Al на GaAs / Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Поверхность. – 2000. - № 11. - С. 84-88.
- A40. Shashkin V. Aluminum nanoparticles embedded into GaAs: deposition and epitaxial overgrowth by MOCVD / V. Shashkin, V. Daniltsev, M. Drozdov, Yu. Drozdov, A. Murel, N. Vostokov, S. Rushworth // Booklet of Extended Abstracts of 10<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy. Italy, Lecce, June 8 – 11, 2003. - P. 79-82.
- A41. Востоков Н.В. Формирование нанокластеров Al и их заращивание слоем GaAs в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии / Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, В.И. Шашкин // Известия РАН. Серия физическая. 2004. - Т. 68. - № 1. - С. 55-57.
- A42. Shashkin V.I. Incorporation of Mo and W nanoclusters into GaAs structures grown by MOCVD / V.I. Shashkin, B.N. Zvonkov, N.V. Vostokov, Yu.A. Danilov, Yu.N. Drozdov, A.V. Murel // Extended Abstracts of 11<sup>th</sup> European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy. Lausanne, Switzerland, 5–8<sup>th</sup> June 2005. - P. 119-121.
- A43. Востоков Н.В. Формирование структур с нанокластерными слоями Al, внедрёнными в матрицу GaAs в процессе металлоорганической газофазной эпитаксии / Н.В. Востоков, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, Д.А. Пряхин, В.И. Шашкин, И.Ю. Шулешова // Письма в журнал технической физики. – 2007. - Т. 33. - В. 10. - С. 83-88.
- A44. Данильцев В.М. Применение АСМ для исследования режимов эпитаксиального роста гетероструктур AlGaAs/GaAs / В.М. Данильцев, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Мурель, Д.А. Пряхин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Материалы симпозиума “Нанофизика и

- нанoeлектроника". Нижний Новгород, 25-29 марта 2005 г. - С. 118-119.
- A45. Востоков Н.В. О роли туннелирования в наноконтактах металл-полупроводник / Н.В. Востоков, В.И. Шашкин // Журнал экспериментальной и технической физики. – 2004. – Т. 126. - В. 1(7). - С. 1-7.
- A46. Востоков Н.В. Электрические свойства наноконтактов металл-полупроводник / Н.В. Востоков, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2004. - Т. 38. - В. 9. - С. 1084-1089.
- A47. Востоков Н.В. Адмитанс и нелинейная емкость многослойной структуры металл-полупроводник / Н.В. Востоков, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2008. - Т. 42. - В. 7. - С. 799-803.
- A48. Востоков Н.В. Изучение свойств структур с нанокластерами Al, внедренными в матрицу GaAs / Н.В. Востоков, С.А. Гусев, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, А.И. Корыгин, А.В. Мурель, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. - В. 1. – Р. 92-95.
- A49. Алешкин В.Я. Пикосекундная кинетика фотоносителей в арсениде галлия с нанокластерами алюминия / В.Я. Алешкин, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, А.А. Дубинов, З.Ф. Красильник, А.И. Корыгин, Д.И. Курицын, Д.А. Пряхин, В.И. Шашкин // Физика и техника полупроводников. – 2007. - Т. 41. - В. 8. - С. 929-933.
- A50. Данильцев В.М. Электронный транспорт через гетерограницу Al/GaAs(100): управление эффективной высотой барьера (0.7...0.1эВ) / В.М. Данильцев, А.В. Мурель, В.И. Шашкин, О.И. Хрыкин // Тезисы докладов II Российской конференции по физике полупроводников. Зеленогорск, 26 февраля - 1 марта 1996 г. - С. 47.
- A51. Шашкин В.И. Управление эффективной высотой барьера в эпитаксиальных структурах Al/n-GaAs, изготовленных в едином цикле МОГФЭ / В.И. Шашкин, А.В. Мурель, Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин // Микроэлектроника. – 1997. - Т. 26. - В. 1. - С. 57-61.
- A52. Shashkin V.I. Schottky barrier height engineering for millimeter-wave diodes / V.I. Shashkin, V.M. Daniltsev, O.I. Khrykin, A.V. Murel, Yu.I. Chechenin, A.V. Shabanov // Proceedings of 1997 In-

- ternational Semiconductor Device Research Symposium. Charlottesville, USA, December 10-13, 1997. - P. 147-150.
- A53. Шашкин В.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью  $\delta$ -легирования: расчёт и эксперимент для Al/GaAs / В.И. Шашкин, А.В. Мурель, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин // Физика и техника полупроводников. – 2002. - Т. 36. - В. 5. - С. 537-542.
- A54. Шашкин В.И. Диагностика низкобарьерных диодов Шоттки с приповерхностным  $\delta$ -легированием / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Физика и техника полупроводников. – 2008. - Т.42. - В. 4. - С. 500-502.
- A55. Shashkin V.I. Comment on “Schottky diodes with a  $\delta$ -doped near-surface layer” / V. Shashkin, A. Murel // Journal of Applied Physics. - 2004. – V. 95. – N 4. - P. 2190-2191.
- A56. Шашкин В.И. Теория туннельного токопереноса в контактах металл-полупроводник с приповерхностным изотипным дельта-легированием / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Физика и техника полупроводников. – 2004. - Т. 38. - В. 5. - С. 574-579.
- A57. Шашкин В.И. Диагностика микроволновых низкобарьерных детекторных диодов / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Материалы 17<sup>ой</sup> международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Крымико-2007. Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2007 г. - С. 587-588.
- A58. Шашкин В.И. Вольт-амперная характеристика контакта металл-полупроводник с барьером Мотта / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Физика твёрдого тела. – 2008. - Т. 50. - В. 3. - С. 519-522.
- A59. Шашкин В.И. Свойства контактов Мотта с ультра малым барьером металл-полупроводник / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Физика твёрдого тела. - 2008. – Т. 50. - В. 10. - С. 1883-1887.
- A60. Шашкин В.И. Решение задачи инжекции носителей тока в изолирующий слой при самосогласованных граничных условиях на контактах / В.И. Шашкин, Н.В. Востоков // Физика и техника полупроводников. - 2008. - Т. 42. - В. 11. - С. 1339-1344.
- A61. Shashkin V.I. Analytical solution for charge-carrier injection into an insulating layer in the drift diffusion approximation / V.I. Shashkin, N.V. Vostokov // Journal of Applied Physics. - 2008. – V. 104. – P. 123708.

- A62. Шашкин В.И. Барьерные и инжекционные механизмы нелинейности тока в детекторных диодах Мотта / В.И. Шашкин, Н.В. Востоков, А.В. Мурель // Материалы XIII Международного симпозиума «Нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 16–20 марта 2009 г. - С. 167-168.
- A63. Оболенский С.В. Токоперенос в диодах Мотта: эффекты горячих электронов / С.В. Оболенский, Н.В. Востоков, А.В. Мурель, В.И. Шашкин // Материалы XIII Международного симпозиума «Нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 16–20 марта 2009 г. - С. 320-321.
- A64. Шашкин В.И. Обобщённая теория токопереноса в низкобарьерных диодах Мотта с приповерхностным дельта-легированием: сопоставление с экспериментом / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Материалы XIII Международного симпозиума «Нанозлектроника», г. Нижний Новгород, 16–20 марта 2009 г. - С. 398-399.
- A65. Molodnyakov S.P. Submicron Planar Schottky Diodes for Submillimeter Wavelengths / S.P. Molodnyakov, V.I. Shashkin, L.V. Sukhodoev, V.M. Daniltzev, A.S. Molodnyakov // Proceedings of 1993 International Semiconductor Device Research Symposium. Charlottesville, USA, December 1-3, 1993. - P. 377-380.
- A66. Шашкин В.И. Планарные диоды с управляемой высотой барьера Шоттки для детекторов микроволнового излучения / В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Мурель, А.В. Масловский, О.И. Хрыкин, Ю.И. Чеченин, А.В. Шабанов // Материалы 8<sup>-ой</sup> международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Крымико 1998. Севастополь, Крым, Украина, 14-17 сентября 1998 г. - С. 118-120.
- A67. Вакс В.Л. Автоматизированный стенд для измерения параметров диодных детекторов в миллиметровом диапазоне длин волн / В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, Ю.И. Чеченин, В.И. Шашкин, Ю.А. Дрягин // Материалы 11<sup>-ой</sup> международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Крымико 2001. Севастополь, Крым, Украина, 10-14 сентября 2001 г. - С. 592-593.
- A68. Shashkin V.I. Planar Schottky Diodes with Low Barrier Height for Microwave Detector Application / V. Shashkin, Yu. Chechenin, V.

- Danilt'sev, O. Khrykin, A. Maslovsky, A. Murel, V. Vaks // Proceedings of 23<sup>rd</sup> International Conference on Microelectronics, MIEL 2002. Nis, Yugoslavia, May 12-15, 2002. - P. 335-338.
- A69. Шашкин В.И. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характеристики / В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, Ю.И. Чеченин // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. - Т. 48. - № 6. - С. 544-551.
- A70. Шашкин В.И. Характеристики микроволновых детекторов на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки / В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, Ю.И. Чеченин // Материалы 15<sup>-ой</sup> международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Крымико-2005. Севастополь, Крым, Украина, 12-16 сентября 2005 г. - С. 631-632.
- A71. Шашкин В.И. Детекторы с низкобарьерными диодами Шоттки для матричных систем видения миллиметрового диапазона / В.И. Шашкин, В.Р. Закамов, А.В. Мурель, Ю.И. Чеченин, Ю.А. Дрягин, С.В. Кривов, Л.М. Кукин // Материалы 16<sup>-ой</sup> международной микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", Крымико-2006. Севастополь, Крым, Украина, 11-15 сентября 2006 г. - С. 161-162.
- A72. Shashkin V.I. Millimeter-Wave Detector on the Basis of Low-Barrier Schottky Diodes and a Planar Slot Antenna / V.I. Shashkin, Y.A. Drjagin, V.R. Zakamov, S.V. Krivov, L.M. Kukin, A.V. Murel, Y.I. Chechenin // Conference Digest of the 2006 Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai, China, September 18-22, 2006. - P. 400.
- A73. Shashkin V.I. Planar Antenna-coupled Detector for Matrix Systems of Millimeter Wave Imaging / V.I. Shashkin, V.R. Zakamov, A.V. Murel, Y.I. Chechenin // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'07. Sevastopol, Ukraine, September 17-21, 2007. - P. 351-353.
- A74. Shashkin V.I. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-barrier Schottky Diodes / V.I. Shashkin, Yu.A. Drjagin, V.R.



- Zakamov, S.V. Krivov, L.M. Kukin, A.V. Murel, Y.I. Chechenin // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2007.- V. 28. - N 11. - P. 945-952.
- A75. Шашкин В.И. Низкобарьерные детекторы субтерагерцового диапазона на основе структур металл-полупроводник с приповерхностным дельта-легированием / В.И. Шашкин // Тезисы докладов VIII Российской конференции по физике полупроводников. Екатеринбург, 30 сентября - 5 октября 2007г. - С. 384.
- A76. Шашкин В.И. Планарные детекторы для многоэлементных систем радиовидения миллиметрового диапазона длин волн / В.И. Шашкин, Ю.А. Дрягин, В.Р. Закамов, С.В. Кривов, Л.М. Кукин, А.В. Мурель, Ю.И. Чеченин // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 51. - № 12. - С. 1077-1087.
- A77. Алкеев Н.В. Дробовый шум диодов Шоттки с пониженной высотой барьера / Н.В. Алкеев, С.В. Аверин, А.А. Дорофеев, В.И. Шашкин // Радиотехника и электроника. – 2008. - Т. 53. - № 2. - С. 250-254.
- A78. Закамов В.Р. Использование линейки планарных детекторов для формирования изображений при просвечивании предметов излучением миллиметрового диапазона длин волн / В.Р. Закамов, В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Материалы XII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 10–14 марта 2008 г. - С. 479-480.
- A79. Закамов В.Р. Планарные детекторы для матричных систем видения в миллиметровом диапазоне длин волн / В.Р. Закамов, В.И. Шашкин, А.В. Мурель // Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения. Москва, Россия, 27-30 мая 2008 г. – С. 33-34.
- A80. Закамов В.Р. Исследования диодов с пониженной высотой барьера Al/GaAs в трёхмиллиметровом диапазоне частот / В.Р. Закамов, В.И. Шашкин // Тезисы докладов радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов». п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, 22-27 сентября 2008 г. - С. 41.
- A81. Радзиховский В.Н. Применение низкобарьерных детекторных диодов Шоттки в широкополосном радиометре 3 мм диапазона /

В.Н. Радзиховский, С.Е. Кузьмин, В.Б. Хайкин, С.В. Шлезнин, В.Р. Закамов, В.И. Шашкин // Тезисы докладов радиоастрономической конференции «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов». п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, 22-27 сентября 2008 г. – С. 71.

А82. Закамов В.Р. Модифицированные щелевые антенны миллиметрового диапазона длин волн на подложках с высокой диэлектрической проницаемостью / В.Р. Закамов, Л.М. Кукин, С.В. Кривов, В.И. Шашкин // Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51. - № 10. - С. 864-871.

А83. Закамов В.Р. Исследования диодов с пониженной высотой барьера в планарном смесителе миллиметрового диапазона длин волн / В.Р. Закамов, В.И. Шашкин // Материалы XIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 16–20 марта 2009 г., С. 348-349.

**Шашкин Владимир Иванович**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ  
ЭФФЕКТЫ В СЕЛЕКТИВНО ЛЕГИРОВАННЫХ  
ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРАХ  
МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК**

**Автореферат**

Подписано к печати 18.05.2009 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН,  
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105

10—